

Коливальні та хвильові процеси і живі системи.

Чутливість живих систем до зовнішніх електромагнітних коливань залежить насамперед від діапазону частот та інтенсивності (потужності) коливань. Умовно доступний для вивчення діапазон підрозділяється на три ділянки, в межах кожної з яких є специфічні особливості взаємодії електромагнітних полів з біологічними системами:

а) **постійні та низькочастотні поля** (приблизно до метрового діапазону довжин хвиль);

б) **СВЧ-діапазон** (метрові, дециметрові, сантиметрові хвилі);

в) **КВЧ-діапазон** (міліметрові хвилі, а також субміліметрові).

Вплив електромагнітних коливань на організм людини може бути як корисним, лікувальним, так і шкідливим. Лікувальну дію електромагнітні хвилі надають, наприклад, при гіпертермії (прогрівання злоякісних пухлин, з метою їх руйнування, до температури 42–45 °С), в лазерній хірургії, діаметрії. Великі перспективи намічаються зараз при використанні в медицині для лікування різних захворювань електромагнітних коливань низької інтенсивності в міліметровому діапазоні довжин хвиль. Шкідливі для організму інтенсивні електромагнітні коливання в будь-якому діапазоні частот з щільністю потужності, що перевищує десятки мВт на 1 см² опромінюваної площі.

На думку учених, первинні ефекти такої взаємодії, які роблять визначальний вплив на поведінку живого об'єкту, розігруються в основному на рівні клітини, що являється найпростішою (елементарною) живою системою.

Хвильові процеси істотні для життєдіяльності організмів при відсутності зовнішнього подразника. Тому можна було б також говорити в деякому розумінні про резонансну взаємодію живих систем з хвилями різної природи.

Розуміння механізмів взаємодії зовнішніх полів з біосистемами вимагає вивчення ролі гармонійних та стохастичних коливань, синхронізації коливань і когерентності в життєдіяльності організму, а також структурних змін в клітинах і

модельних системах (моделі біомембран, квазіодновимірні макромолекули та ін.), супроводжуючих як виникнення в них коливань, так і порушення (або, навпаки, корекцію) існуючих режимів життєдіяльності.

У найзагальнішому вигляді **хвилю** можна визначити як періодичне в часі та просторі зміну якогось параметра процесу, що розповсюджується з кінцевою швидкістю і несе з собою енергію без перенесення речовини. Під **коливанням** зазвичай розуміють рух, що володіє властивістю повторюваності. З урахуванням цих визначень очевидним є твердження про те, що **хвиля** – це процес розповсюдження коливань (у просторі).

Хвилеві і коливальні процеси широко поширені в природі та грають велику роль в житті організмів. На думку відомого біофізика А.М. Жаботінського, «в основі всіх видів біологічного руху знаходяться коливальні (циклічні) процеси». Сам факт коливального процесу є проявом властивостей динамічної системи, деякий параметр якої періодично відхиляється від свого рівноважного (середнього) значення під впливом сукупності зовнішніх і внутрішніх сил.

Коливання можуть мати найрізноманітнішу природу: електронну, атомну, молекулярну, хімічну, акустичну, електромагнітну і т. д.

Останніми роками учені велику увагу приділяють періодичним коливальним процесам в біологічних і хімічних системах. Періодичні біохімічні процеси грають важливу загальнобіологічну роль.

Електронним коливанням відповідають переходи електронів в атомі з одного енергетичного рівня на іншій, вони обумовлюють поглинання світла в ультрафіолетовій та видимій частинах оптичного спектру.

Внутрішньомолекулярні рухи атомів обумовлюють поглинання в інфрачервоній області, а *обертальні рухи* молекул – поглинання електромагнітних хвиль з довжиною від сотень мікрон до сантиметрів.

Багатоатомні макромолекули можуть знаходитися в різних конформаціях, яким відповідають на енергетичній діаграмі близькі значення енергії. Ця енергія істотно менше середньої енергії теплового руху kT , а період таких коливань складає величину від доль секунди до хвилин. Явище синхронних (у макрооб'ємі) оборотних переходів макромолекул з одного стану в інший отримало назву «Конформаційні

коливання». На думку відомого біофізика С.Е. Шноля, **зміна конформацій молекул є основним механізмом їх біологічного функціонування** (по термінології інших учених – *постійні осциляції макромолекулярного каркаса*).

Окрім конформаційних коливань важливу роль в живих системах грають коливальні (автоколивальні) хімічні реакції, вперше виявлені в 50-х роках Б.П. Белоусовим і детально вивчені в роботах А.М.Жаботінського (автохвилі Белоусова–Жаботінського). Ці реакції протікають не тільки в гетерогенній, але і, що особливо цікаво, в гомогенному середовищі. Так, наприклад, Белоусов виявив, що при окисненні лимонної кислоти броматом в розчині, що містить іони церію, періодично з'являється і зникає жовте забарвлення. Ця автоколивальна реакція вивчена А.М. Жаботінським і послужила основою для дослідження великого класу автохвильових процесів в неживій і живій природі.

Автоколивальні біохімічні реакції, що забезпечують клітину енергією, – відповідний кандидат на роль головного внутріклітинного годинника, оскільки в цьому випадку знаходить пояснення стійкість коливань до зовнішніх дій. Коливання відбуваються також на рівні субклітинних одиниць, в окремих ділянках клітинних мембран, клітин, сукупності великого числа клітин, органів. Тут ми підходимо до такого важливого поняття в теорії коливальних процесів, як **«синхронізація коливань»**. Як відомо, під *синхронізацією коливань* розуміють їх узгодження в часі, який можливий як по початковій фазі коливання, так і по частоті. Як у техніці, так і в живих системах синхронні коливання принципово важливі для забезпечення нормального функціонування систем життєзабезпечення. Мабуть, функціонування живого організму неможливе без існування різних механізмів синхронізації коливань на різних рівнях організації живої матерії. Великий практичний інтерес представляє питання про синхронізацію коливань, починаючи вже з атомного і молекулярного рівнів, які багато в чому визначають хімічні і біохімічні реакції.

Синхронізувати конформаційні коливання, наприклад, можуть електромагнітне випромінювання, акустичні хвилі, хвилі структурної перебудови середовища, хімічне поле (градієнти концентрації низькомолекулярних речовин).

У першому і другому випадках джерелом електромагнітних і акустичних полів можуть бути самі атоми або молекули. Відомо, що прискорений рух електричних

зарядів є джерелом виникнення електромагнітних хвиль. У разі коливального руху зарядів (тут автоматично присутнє прискорення) виникає періодичне електромагнітне поле. Періодична зміна об'єму макромолекул призводить до генерації акустичних хвиль з частотою конформаційних переходів, а зміна об'єму окремих частин макромолекули визначає акустичні хвилі в діапазоні надвисоких частот.

Навіть на рівні клітини протікає величезна кількість різних ферментативних реакцій, які визначають складні акустичні і електромагнітні поля клітини і сукупності клітин. За допомогою цих полів і здійснюється, можливо, взаємодія макромолекул, а також клітин на відстанях, що перевищують розміри області міжклітинних контактів.

Оригінальні ідеї про роль зовнішніх синхронізуючих електромагнітних полів міліметрового діапазону довжин хвиль низької інтенсивності в регуляції функцій людського організму містяться в роботах Н.Д. Девяткова і М.Б. Голанта. Як відомо, міліметрові хвилі володіють рядом характерних особливостей взаємодії з живими системами. Ці хвилі майже повністю поглинаються в шкірному покриві на глибині декілька десятків міліметра (основним поглиначем є молекули води, якої припадає на частку 60 % маси шкіри). Проте, в полі дії цих хвиль знаходяться рецепторні клітини, кровоносні судини, нервові закінчення, імунокомпетентні клітини. Хоча всі первинні ефекти відбуваються в тонкому поверхневому шарі шкіри, міліметрові хвилі роблять сильний вплив на регуляторні (іmunні) процеси в організмі людини. Це послужило підставою для початку використання міліметрових хвиль низької інтенсивності в медицині для лікування різних захворювань.

Періодичні коливання в природі також роблять вплив на різні функції організму, причому первинні ефекти спостерігаються, починаючи з молекулярного і субклітинного рівнів. Давно вже відомо, що в організмі людини і тварин існує «біологічний годинник», який визначає ритмічність діяльності різних систем життєзабезпечення. Тому важливе питання про зв'язок «біологічного годинника» і зовнішніх джерел коливань різної природи. Ці питання мають велике практичне значення, тому що порушення біоритму (десинхроноз) може виявитися шкідливим для здоров'я людини. У живих системах основні фізіологічні і біохімічні процеси

змінюються періодично в часі, що обумовлює наявність біоритмів з різними періодами (наприклад, добові, сезонні ритми). Подібні процеси могли виробитися в процесі еволюції і закріпитися в генетичних апаратах живих організмів (тварин і людини). Найчіткіше виражена періодичність, пов'язана з обертанням Землі навколо осі, – зміною дня і ночі. Ця зміна супроводжується зміною таких параметрів середовища, як температура, спектральний склад світла, атмосферний тиск, магнітні поля та ін., що у свою чергу позначається на процесах життєдіяльності.

Зміна інтенсивності потоку космічних частинок, що викликають іонізацію повітря, обумовлюють різні реакції на рівні клітин.

Добре вивчений також вплив на живі організми періодичних змін сонячної активності. Встановлено, що взаємодія між процесами, що відбуваються на Сонці і Землі, реалізується через зміну магнітного поля Землі. Живі організми проявляють максимальну чутливість не стільки до абсолютного значення магнітного поля, скільки до швидкості його зміни. Можливо, дія магнітного поля на біосистеми відбувається через індуковане або змінне електричне поле.

У живих організмах існує цілий ряд ритмічних процесів, які не можна пояснити тільки впливом зовнішніх чинників. Поки не виявлені джерела, що породжують ці біоритми, які тому називаються **внутрішніми**, або **ендогенними**.

Сучасне життя важко представити без таких досягнень людської цивілізації, як радіозв'язок, телебачення, радіолокація, радіонавігація і т. д. В той же час всі ці області людської діяльності створюють небачений раніше «електромагнітний» фон живої природи, викликають «електромагнітне забруднення навколишнього середовища», причому переважно на тих частотах, дії яких людина традиційно впродовж сторіч не піддавалася. Відомо, що, хоча електромагнітні хвилі були передбачені Дж. К. Максвеллом в 1873 році і експериментально виявлені Г. Герцем в 1888, людство піддавалося їх дії у всі часи свого існування. Це і світло, і інфрачервоне теплове випромінювання, і радіовипромінювання позаземного походження. Серед цих дій електромагнітні хвилі міліметрового діапазону займають особливе місце в тому сенсі, що міліметрове випромінювання космічного походження сильно поглинається атмосферою Землі, і живі організми не могли до

нього пристосуватися. В даний час цей діапазон все ширше освоюється не тільки в різних областях промисловості, але і в медицині, біотехнологія і т. д.

Людина, як і всі живі системи, і сама є джерелом електромагнітного випромінювання. Максимум власного теплового (когерентного) випромінювання тіла людини по довжинах хвиль знаходиться близько 10^4 нм. Потужність такого випромінювання складає декілька сот Вт. Для інфрачервоної ділянки спектру створені вельми чутливі приймачі, так звані тепловізори, в яких теплове випромінювання перетворюється у видиме на екрані дисплея. Визначення теплових карт випромінювання вже зараз грає важливу роль для діагностики ряду захворювань, контролю їх динаміки і лікування.

Окрім теплового випромінювання живі системи видають інформацію про коливальні і хвилеві процеси, властиві їм в ході життєдіяльності. Серед найбільш відомих – відображення електричної активності серця (електрокардіограма) і мозку (електроенцефалограма), освоюється також техніка вимірювання магнітних полів (магнітокардіограма) та ін.

Живі системи володіють феноменальними, навіть в порівнянні з вже створеними фізичними приладами, чутливістю до електромагнітних полів. Це є, з одного боку, добре встановленим фактом, а з іншої – проблемою, що до цих пір не отримала вичерпного пояснення. Наприклад, деякі морські організми (акули, скати) володіють здатністю відчувати поле з напруженістю не більше 10^{-8} В/см², що виявляється в орієнтуванні, пошуку здобичі і т. д. Птахи також відчують поля в близькому діапазоні (одиниці і долі герц) на рівні 10^{-7} В/см². Добові біоритми, які, як встановлено характерні не тільки для птахів, але і для людини, пов'язані з напруженістю поля, не що перевищує сотих доль В на 1 см², а поріг чутливості лежить ще нижче. Виходячи з експериментальних даних про підвищену чутливість, що має нетепловий характер (тобто коли зміни функцій організму відбуваються не тільки унаслідок утворення надмірного тепла в тканинах при поглинанні випромінювання), в СРСР встановлена допустима межа при роботі, наприклад, зі СВЧ-випромінюванням не вище 10 мкВт/см². У США ця величина складає 10 мВт/см².

Дані про дію високочастотних полів на організм людини, з одного боку вельми численні, а з іншою вельми розрізнені, що пов'язане з великою кількістю

дослідницьких груп і умов проведення експериментів. Крім того, часто важко виділити ефект дії саме полів на тлі супутніх процесів.

Широке застосування, у тому числі і в медицині, електромагнітні хвилі височастотного діапазону знайшли саме завдяки тепловій дії, тобто просто як засіб доставки тепла углиб організму при опромінюванні тканин. Серед цих методів – діатермія (на ділянках 0,5-2,0 МГц), індуктотермія (10-16 МГц), УВЧ-терапія (40-50 МГц), мікрохвильова терапія (10^2 - 10^5 МГц).

Найбільш очевидним наслідком взаємодії зовнішніх полів з біосистемами є їх нагрів. При цьому поглинання енергії в тканинах, обумовлене їх електричними і магнітними властивостями, зв'язується головним чином з молекулярною організацією біологічних мембран і з квантовомеханічними властивостями фізіологічно активних молекул.

Що стосується магнітних властивостей біомембран, то за деякими даними, індуктивність їх складає близько десятка доль Генрі для ділянки 1 см^2 товщиною близько 1 нм. Крім того, відмітимо, що на мембранах за рахунок різної концентрації іонів натрію і калія усередині і поза клітиною підтримується значна різниця потенціалів (близько декількох десятків милливольт), що призводить до трансмембранній напрузі поля близько 10^5 В/см^2 . Для розуміння механізмів взаємодії електромагнітного випромінювання з живими клітинами велике значення можуть мати експерименти, виконані спільно ІРЕ АН СРСР (Т.А. Новікова, В.М. Нечасєв та ін.) і біологічним факультетом МГУ (А.Х. Тамбієв та ін.). Об'єктами дослідження були синьо-зелені водорості виду спіруліна. Інтерес до спіруліни пов'язаний з тим, що вона може бути джерелом білка як їжі для людини і тварин. Спіруліна відноситься до прокаріотичних (без'ядерних) багатоклітинних мікроорганізмів. Для неї характерна спіральна форма – тріхома (нитка), що складається з великої кількості клітин, розташованих в ряд. Тріхома має довжину 20–300 мкм і товщину 10 мкм. Клітина спіруліни є рекордсменом за змістом білку (60–70% сухої речовини, що, наприклад, удвічі перевищує вміст білку в сої). У білці спіруліни представлені всі незамінні амінокислоти, що підкреслює її високі живильні якості. Клітини спіруліни містять велику кількість мінеральних солей і продукують велику кількість вітамінів групи В. Помімо цього, спіруліна може бути використана в медицині при лікуванні

різних захворювань (авітаміноз, ожиріння, гіпертонія та ін.). Не дивно тому, що зараз в багатьох країнах спіруліні як цінному живильному продукту приділяється велика увага.

Спочатку спіруліну опромінювали безперервними хвилями ($\lambda \approx 7,1$ мм, потужність випромінювання ≈ 1 мВт/см², час опромінювання ≈ 30 хвилин). Потім проводилося імпульсне опромінювання (χ – 3 см, тривалість імпульсу ≈ 15 нс, потужність в імпульсі 30 МВт, число імпульсів 15).

За цих умов приріст біомаси склав більше 200% в порівнянні з контролем. Паралельно із зростанням біомаси клітини спіруліни виділяють в середовище існування (культуральну рідину) ряд біологічно активних з'єднань, зокрема вітамін В₂, кількість якого після опромінювання збільшувалася в 2 рази, зростає на десятки відсотків фотосинтетична активність. Дивно, що стимулюючий ефект зберігався при декількох подальших пересіваннях. Залежно від фази зростання клітин мінявся вміст іонів натрію та калію в середовищі: при інтенсивному розвитку обидва іони поглиналися з середовища, а при уповільненні – виділялися. Було відмічено, що ефект стимуляції залежить від частоти і потужності випромінювання.